#### **文章编号:** 1672-8785(2016)09-0025-05

# 基于相位一致性的红外图像 边缘检测方法

## 郭龙源 张国云 欧先锋 涂 兵 吴健辉

#### (湖南理工学院复杂系统优化与控制湖南省普通高等学校重点实验室,湖南岳阳 414006)

**摘 要:**由于红外图像的灰度和对比度较可见光图像的低,用基于灰度的边缘检测方 法检测红外图像的效果不佳。针对这种情况,利用相位一致性对灰度和对比度的变化 具有不变性的原理,提出了基于相位一致性的红外图像边缘检测方法。首先计算红外 图像的相位一致性值,然后采用 K-mean 法分割出包含边缘的区域,最后用形态学相关 方法生成边缘曲线。实验结果表明,该方法对红外图像边缘的检测效果比 Canny 算法 更准确。

关键词:相位一致性;红外图像;边缘检测

中图分类号: TP751.1 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.09.005

## Edge Detection Method of Infrared Images Based on Phase Consistency

GUO Long-yuan, ZHANG Guo-yun, OU Xian-feng, TU Bing, WU Jian-hui

(Key Laboratory of Optimization and Control for Complex Systems(College of Hunan Province), Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

**Abstract:** Because the gray level and contrast of infrared images are lower than those of visible images, it is not effective for an edge detection method based on gray level to detect infrared images. For this reason, an infrared image edge detection method based on phase consistency is proposed according to the invariant principle of phase consistency for gray scale and contrast. First, the phase consistency value of an infrared image is calculated. Then, the regions containing edges are segmented by K-mean's method. Finally, the edge curves are generated by a morphological method. The experimental results show that the proposed method is more effective than the Canny algorithm in infrared image edge detection.

Key words: phase consistency; edge detection; infrared image

## 0 引言

红外图像反映的是目标及背景向外辐射能 量的差异。它可以克服部分视觉上的障碍,在 雾、霾等天气环境下具有较大的作用距离和较 强的抗干扰能力。这使得它在军事和民用领域 具有广泛的应用前景。但红外图像的清晰度低 于可见光图像,目标与背景的分界较模糊,加上 红外传感器的一些特有的噪声,使得红外图像

**收稿日期**: 2016–05–12

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目 (61005008, 61201435); 湖南省高校创新平台开放基金项目 (14K042) **作者简介:** 郭龙源 (1973-), 男, 福建龙岩人, 副教授, 博士, 主要从事计算机视觉、图像处理研究。 E-mail: guolongyuan@163.com 的边缘检测比较困难。近年来,除了传统的检测 算法,人们提出了许多红外图像边缘检测方法 <sup>[1-5]</sup>。然而这些方法都是基于图像灰度梯度或 图像灰度空间的其它度量来检测边缘的,边缘 提取的效果都依赖于图像的对比度和灰度。

相位一致性<sup>[6]</sup>与以上方法有根本的不同, 它不是基于灰度梯度,而是基于相位来检测图 像,即假定图像的傅里叶分量相位最一致的点为 特征点。相位一致性特征的特点是无需对波形 进行任何假设,只是在傅里叶变换域里简单地 按相位的一致性程度寻找特征点。阶跃、线和屋 顶等边缘类型都会有相位一致性高的点。这更 有利于红外图像边缘特征点的确定。由于红外 图像的边缘处经常较模糊,灰度值的变化率也 没有可见光图像的大,所以红外图像的边缘区 域经常是屋顶或马赫带类型的。根据相位一致性 这一优点,本文提出了基于相位一致性的红外 图像边缘检测方法。结果表明,本方法对红外图 像的检测比传统的基于梯度的边缘检测算法具 有更好的效果。

本文的结构是, 第2节介绍相位一致性与局 部能量的关系和计算公式; 第3节描述相位一 致性边缘检测的方法; 第4节对所提出的算法进 行仿真实验, 并与 Canny 算法检测效果进行比 较; 最后一节对算法进行总结。

## 1 相位一致性和局部能量

对于一维信号 f(x),其傅里叶展开式为

$$f(x) = \sum_{n} A_n \cos(n\omega x + \varphi_{n0}) = \sum_{n} A_n \cos(\varphi_n(x))$$
(1)

式中, 第 n 个傅里叶展开分量的幅值是  $A_n$ ,  $\omega$ 为角频率,  $\varphi_{n0}$  为第 n 个傅里叶展开分量的初 相,  $\varphi_n(x)$  为 x 处第 n 个傅里叶分量的相位值。 Morrone 等 <sup>[6]</sup> 人定义相位一致性为

$$PC(x) = \max_{\bar{\varphi} \in [0, 2\pi]} \frac{\sum_{n} A_n \cos[\varphi_n(x) - \bar{\varphi}(x)]}{\sum_{n} A_n}$$
(2)

式中,  $\varphi(x)$  是使 *PC* 在 *x* 点取极大值时傅里叶 变换各分量相角的加权平均。由式 (2) 可知, 当

傅里叶变换各分量相角  $\varphi_n(x)$  与  $\bar{\varphi}(x)$  的差值和 最小时,相位一致性最大。为了解决式 (2)相位 一致性运算量大的问题, Venkatesh 等人 <sup>[7]</sup> 引进 了局部能量的概念。局部能量 E(x) 可描述为

$$E(x) = \sqrt{F^2(x) + H^2(x)}$$
(3)

式中, F(x) 为实值信号, H(x) 为F(x) 的 Hilbert 变换。



图 1 相位一致性函数、局部能量函数以及信号 各 Fourier 分量间的关系

图 1 显示了相位一致性、局部能量与傅里 叶变换各分量幅度之间的关系。从图中可以知 道,总能量是局部傅里叶分量在 *E*(*x*) 方向上投 影的和:

$$E(x) = \sum_{n} A \cos(\varphi_n(x) - \bar{\varphi}(x)) \tag{4}$$

结合式(2)和式(4),可以进一步得到:

$$PC(x) = E(x) / \sum_{n} A_{n}$$
(5)

由式(5)可知,相位一致性等于局部能量和傅里 叶变换各分量幅度之和的比值, *E*(*x*)中包含局 部傅里叶分量。因此,相位一致性与信号的整体 大小无关,而只与分量相角的分布有关。也就是 说,相角值越集中,相位一致性就越大,这也是 其名称的由来。这样就保证了其对图像的亮度 和对比度的不变性。 为了使相位一致性更贴近实际情况,还要 解决噪声影响和在某些情况下频率范围过窄的 问题。

为了减少噪声的影响, Kovesi<sup>[8]</sup> 对式 (5) 进行了修正:

$$PC(x) = \frac{\lfloor E(x) - T \rfloor}{\sum_{n} A_{n}(x) + \varepsilon}$$
(6)

式中,操作符[]的意义为

$$\lfloor x \rfloor = \begin{cases} x & if \ x > 0 \\ 0 & other \end{cases}$$

T 为均值  $\mu_R$ 、方差  $\sigma_R^2$  的 Rayleigh 分布噪声,  $\varepsilon$  的作用是防止分母过小或为零。

经过频率扩展相位一致性函数,再将式(6) 定义为

$$PC(x) = \frac{W(x)\lfloor E(x) - T\rfloor}{\sum_{n} A_n(x) + \varepsilon}$$
(7)

式中,

$$W(x) = \frac{1}{1 + e^{r(e-s(x))}}$$
$$s(x) = \frac{1}{N} \left( \frac{\sum_{n} A_n(x)}{A_{max}(x) + \varepsilon} \right)$$

N 是用到的尺度数目。  $A_{max}(x)$  为一滤波器对 响应的最大幅度。加入  $\varepsilon$  是为了防止  $A_{max}(x)$  过 小时出现不稳定状态。 c 是扩展因子的截断值, 通常取 0.4。 $\gamma$  为增益控制因子,通常取值为 10。

### 2 基于相位一致性的边缘检测

相位一致性边缘检测方法首先计算图像所 有点的相位一致性值,再用最大类间方差法对 相位一致性变换后的图像进行分割,获得灰度 值大的区域;然后对这些区域采用形态学方法进 行处理,最后获得边缘曲线。

### 2.1 相位一致性值的计算

由第2节可知,通过计算局部能量可以获 得相位一致性的值。局部能量的两个部分可由 信号与一对正交滤波器的卷积来估计<sup>[9]</sup>。局部 能量可以表示为

$$E(x) = \sqrt{(I(x) * M_{even})^2 + (I(x) * M_{odd})^2}$$
(8)

式中, \* 表示卷积。 Meven 是偶对称滤波器, Modd 是奇对称滤波器。

根据 Venkatesh 和 Owens<sup>[6]</sup> 的研究, 两个正交 滤波器中,其中一个是另一个的 Hilbert 变换, 且二者的 L<sup>2</sup> 范相等,每个滤波器的直流分量为 0。相位一致性计算时,主要考虑二维滤波器的 形状、滤波器的方向和数量和各个方向数据的 求和等三方面问题。

由于 Log-Gabor 滤波器在对数尺度下是等带 宽的, 且具有频响侧重高频、无直流成分和在同 等时域宽度情况下可覆盖比 Gabor 滤波器更大 的带宽等优点,本文采用 Log-Gabor 滤波器。该 滤波器具有 6 个方向, 方向间隔为 30°。最后, 各个方向数据的求和是对所有尺度和方向能量 函数的求和,再进行归一化。根据式(7),二维 相位一致性函数的表达式为

$$PC_2(x) = \frac{\sum\limits_{o} \sum\limits_{n} W_o(x) \lfloor A_{no} \Delta \phi_{no}(x) - T_o \rfloor}{\sum\limits_{o} \sum\limits_{n} A_{no} + \varepsilon}$$
(9)

(9) 式中, o 表示方向, n 表示尺度。

对热成像仪获得的红外图像(图2),利用式 (9)计算每个像素的相位一致性值,获得的图像 如图3所示。从图3中可以清楚地看到,图像边 缘处的值明显高于周围非边缘处的值。



图 2 红外图像



图 3 相位一致性图像



图 4 分类后提取的边缘区域(白色)

#### 2.2 边缘的确定

从前面的分析中可以知道,在图像的边缘 附近,相位一致性的值比非边缘区域像素的要 大。根据这个事实,本文首先用二维 K-mean 法 对相位一致性变换后的图像像素进行分类,提 取灰度值大的区域;然后对这些区域采用形态 学的方法进行处理,最后获得边缘曲线。

K-means 算法是模式识别中一种基于邻近法则的无监督分类算法,但基于一维直方图的分类算法只考虑了图像的灰度值信息,对噪声和孤立点比较敏感。二维 K-means 算法增加了像素点周围领域的信息,从而降低了噪声和孤立点对类中心值的影响。设 *f*(*p*) 是像素 *p*(*x*,*y*) 的灰度,定义领域的平均灰度值为

$$h(p) = \frac{1}{S(\sigma)} \sum_{p_i \in \sigma} f(p_i)$$
(10)

式中,  $\sigma$  是以 p(x,y) 点像素为中心的领域,  $S(\sigma)$ 是领域的面积。图像  $I_{M \times N}(x,y)$  可以生成  $M \times N$ 个数据对 (f(p), h(p))。后续处理与一维 K-means 聚类算法过程类似,即选取初始的类中心,计算 数据对 (f(p), h(p)) 到类中心的距离,把每个数据 对分到离它最近的类中心所在的类中;当所有数 据点的分类完成以后,重新计算各类的类中心: 反复以上过程直到类中心的位置不再变化。

相位一致性图像边缘与非边缘的区别明显,因此利用 K-mean 方法将图像像素分成2类, 它们之间的区分度很好。图4显示了分类并提取边缘区域的结果。

## 3 实验

为了验证基于相位一致性的边缘检测方法 的性能,本文做了2个边缘检测实验。实验一, 在MATLAB环境下,用相位一致性方法和Canny 方法处理加噪声的可见光图像并进行比较,这 是为了检验算法对物体表面的光照变化和噪声 等影响因素的鲁棒性。实验二,检验本文算法对 红外图像边缘检测的效果,该红外图像由热像 仪采集。

图 5 显示了用相位一致性方法和 Canny 方 法进行边缘检测的结果。图 5(a) 是原始图像, 其 具有反光和多种类型的边缘, 便于比较检测的 效果。图 5(c) 表明本文方法对各方向边缘都有 较好的检测效果, 对于物体表面反光处也有很 好的鲁棒性。而 Canny 检测在垂直边缘处存在 变形的情况 (图 5(b) 的 1 处), 且将表面反光误 判为边缘 (图 5(b) 的 2 处)。对于有高斯噪声的 图像 (图 5(d)), 虽然两种检测方法都受到了噪声 的影响, 但本文方法的误判比 Canny 方法少。

实验二的检测结果如图 6 所示。本文方法 检测到的图像特征比 Canny 方法的更丰富和稳 定。比如,本文方法检测到了图像左下角的道路 边栏杆,而 Canny 方法没有检测到部分的道路边 沿。实验结果表明,相位一致性的边缘检测方法 不仅对光照变化和高斯噪声有较好的鲁棒性, 对于高噪声和低分辨率的红外图像也有较好的 检测效果。





# (d) 原图 (加高斯噪声) (e)Canny 边缘检测 (f) 相位一致性边缘检测 图 5 相位一致性和 Canny 边缘检测方法的检测效果图



(a) 红外图像
 (b) Canny 边缘检测
 (c) 相位一致性边缘检测
 图 6 相位一致性和 Canny 方法检测红外图像边缘特征的结果比较

# 4 结束语

相位一致性在相位空间中描述图像,与信号的整体大小无关,从而保证了图像灰度和对比度的不变性。因此,相位一致性特征特别适用于红外图像处理。根据这一特点,提出了基于相位一致性的边缘检测方法。该方法不仅对红外图像边缘的检测效果比 Canny 算法的更准确,而且对可见光图像检测中物体的表面反光有很好的鲁棒性。当然,相位一致性的数值受到一些参

数的影响,而这些参数是由经验确定的,如何能 根据图像情况自动设置这些参数可能是今后的 研究方向。

#### 参考文献

 Liu J, Liu C C, Wang B Y, et al. A Novel Algorithm for Detecting Center of Tropical Cyclone in Satellite Infrared Images[C].*IEEE International on Geo*science and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015: 917–920.

(下转第36页)